

# EL ARTE DE LA CANTERÍA HISTORIA Y TÉCNICA



El Arte de la Cantería  
Historia y técnica

© de la edición, Instituto Juan de Herrera

© del texto, los autores

Motivo de cubierta: *piedra de Villamayor en un detalle de la bóveda elipsoidal descrita en el Epilogo*

1ª edición: diciembre, 2023

ISBN: 978-84-9728-617-6

Depósito Legal: M-18776-2023

Impreso en España-Printed in Spain

Fotocomposición e impresión: GRACEL ASOCIADOS SLL

*Todos los derechos reservados. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse ni transmitirse sin permiso escrito del Instituto Juan de Herrera*

# **El Arte de la Cantería**

## **Historia y técnica**

*edición a cargo de*

Eduardo Azofra Agustín

Enrique Rabasa Díaz

Alexandra M. Gutiérrez Hernández

## **NOTICIA A MODO DE EPÍLOGO**



# La construcción de la bóveda elipsoidal de Gaspard Monge

Enrique Rabasa Díaz  
*Universidad Politécnica de Madrid*

La colaboración entre el Ayuntamiento de Villamayor, la Universidad de Salamanca, la asociación francesa Compagnons du Devoir y la Universidad Politécnica de Madrid, ha dado lugar a la realización de varios talleres y el montaje de aparejos en piedra tallada que en ellos se han trabajado. El resultado ha sido la reproducción de los arcos mixtilíneos de las Escuelas Menores, instalada frente a la Facultad de Geografía e Historia, una escalera de caracol y una bóveda de arista montadas en el interior. Además de esto, en el invierno de 2022 y 2023, el trabajo en el Taller de Cantería de la ETS de Arquitectura de Madrid y unas estancias de aprendices de los Compagnons, han permitido realizar y montar una bóveda singular en piedra, de un tipo ideado hace 228 años pero nunca hasta ahora ejecutada, que explicamos a continuación.

## **BÓVEDAS CON DESPIECE SEGÚN PARALELOS Y MERIDIANOS**

Las bóvedas semiesféricas en piedra, de las que llamamos de media naranja, han sido construidas habitualmente según un aparejo convencional que sigue con sus cortes los paralelos y meridianos de la esfera. Las piezas resultantes son dovelas repartidas en hileras circulares, siendo iguales todas las de la misma hilada (figura 1).

En este tipo de bóveda, cada pieza presenta una superficie que corresponde al intradós, esférica por tanto; está separada de otras de la misma hilada por planos verticales que son convergentes en el eje de la bóveda, y las superficies de contacto de cada hilada con las anterior y posterior son lechos que son troncos de cono, más cerrados según



Figura 1. Despiece según paralelos y meridianos en una bóveda semiesférica (izquierda) y en una bóveda sobre planta elíptica (derecha).

subimos.<sup>1</sup> Este despiece da lugar a dovelas cuyas caras, la de intradós y las de los lechos y las juntas, son superficies diversas, pero se encuentran entre ellas según ángulos ortogonales.<sup>2</sup> Es decir, la pieza no presenta ángulos agudos.

Esta es una condición deseable en cantería, evitar los ángulos agudos, siempre delicados. Otra regla no escrita de los despieces de cantería es que las superficies diseñadas para lechos y juntas sean superficies fácilmente comprobables en el proceso de talla, con el auxilio de reglas o escuadras. Y en este caso, en efecto, así resulta, ya que se trata de superficies planas y conos.

Cuando ha sido propuesto cubrir una planta no circular, sino oblonga, oval o elíptica, con una bóveda semejante, se ha adaptado este mismo sistema de paralelos y meridianos. Lo que ahora llamamos óvalo y elipse no son la misma cosa, pero se pueden parecer enormemente. Para cubrir una planta oval o elíptica se puede adoptar un aparejo semejante al de la bóveda semiesférica, estirándolo, deformándolo por alargamiento, de la manera adecuada.<sup>3</sup> Así se han construido muchas desde el Renacimiento. Al hacer esto, la base circular pasa a ser una elipse (o un óvalo); y lo que antes eran troncos de cono circular formando los lechos son ahora troncos de cono de directriz elíptica (u oval), no de revolución. El resultado de esta transformación es que las piezas pierden esa cualidad que consistía en presentar encuentros ortogonales entre sus facetas. Ahora hay ángulos agudos. Y los lechos son superficies formadas por rectas, pero no tan sencillas como antes.

Eso no ha impedido que esta solución apareciera en tratados como el de Alonso de Vandelvira, y fuera ejecutada en casos tan notables como el de la sala ca-



Figura 2. Sala capitular de la catedral de Sevilla.

pitular de la catedral de Sevilla (figura 2). A pesar de los inconvenientes, de un débil cumplimiento de las condiciones ideales, se ha podido construir así en muchas ocasiones.

En el siglo XVIII encontramos tratados que estudian las particularidades de este despiece no ideal, mostrando la manera de controlar sus líneas (figura 3). Pero también se propuso alcanzar la ortogonalidad de los encuentros, con algunos recursos. En el caso de plantas ovales era posible dividir la superficie de la bóveda en partes distintas de manera que cada una diera lugar a dovelas con encuentros ortogonales y lechos que son conos de revolución (figura 4). La solución se llevó a cabo también en algunos casos, aunque, para grandes excentricidades del óvalo, presentaba dificultades en el encuentro entre los diversos sectores.

#### PROPUESTA DE BÓVEDA ELIPSOIDAL DE GASPARD MONGE

Estas eran las soluciones para el tipo de la cúpula despiezada en piedra sobre planta elíptica u oval al final del siglo XVIII. En aquel momento la vida del

1. El trasdós de la pieza puede ser otra superficie esférica, o, si se trata de la hoja interior de una bóveda trasdosada con otra hoja o cubierta de otra manera, una superficie simplemente desbastada.
2. En efecto, las juntas son planas, que siguen los meridianos de la esfera; los lechos son superficies cónicas que siguen los paralelos. Todas ellas son superficies que podemos imaginar generadas por el movimiento de una que siga el radio de la esfera, discurriendo por meridianos o paralelos. El radio encuentra siempre a la esfera ortogonalmente, de manera que el ángulo formado por la cara de intradós y los lechos y juntas que parten de ella siempre es un ángulo de noventa grados.
3. En lo que un geómetra llamaría transformación afin.

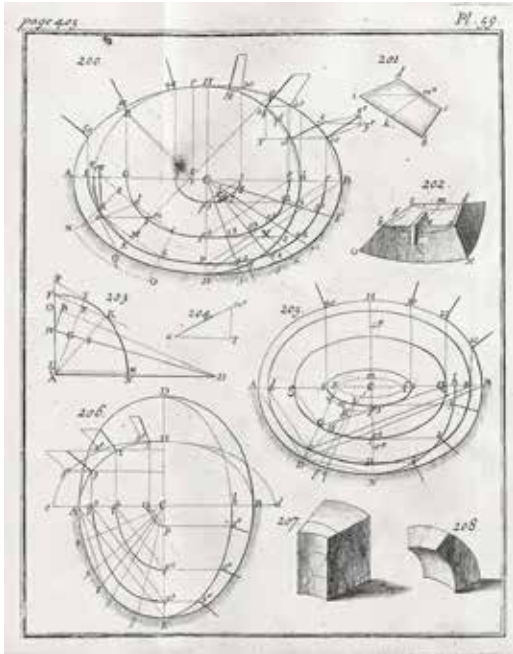


Figura 3. Bóveda elíptica en el tratado de Frézier (1737)

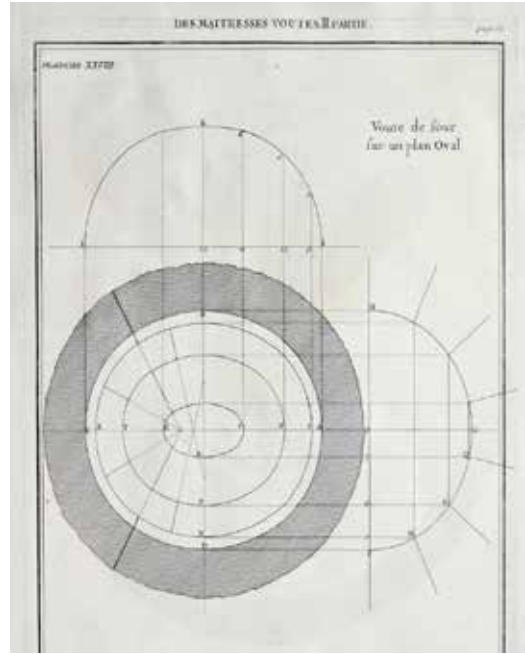


Figura 4. Bóveda oval en el tratado de De la Rue (1728)

francés Gaspard Monge, físico y matemático notable, cambió a consecuencia de la Revolución. Monge tenía un origen humilde, y por ese motivo no se le había permitido seguir su carrera en los centros de investigación más importantes. Había desarrollado sus trabajos en la escuela de ingenieros militares de Mézières. Allí, su organización de una disciplina gráfica llamada Geometría Descriptiva, fue considerada secreto militar. Ferviente partidario de la Revolución, al llegar ésta tuvo la oportunidad de explicar públicamente esta Geometría Descriptiva en la École Normales fundadas por él. Además de esta institución, que tendría una importancia notable en Francia hasta hace muy poco, fundó también la École Polytechnique, modelo para la enseñanza técnica en el resto del continente. Se ocupó del sistema de pesas y medidas, del calendario republicano, y de otras empresas ligadas a la razón y el progreso.

Por ese motivo, la Geometría Descriptiva es una materia que tiene una fecha concreta de nacimiento, 1795. Es cierto, y el mismo Monge lo reconoce, que estaba fundamentada en los recursos gráficos empleados en el mundo de la cantería durante siglos,

pero supone una ordenación de los procedimientos capaz de resolver eficazmente los problemas espaciales, concretos o abstractos. Las lecciones impartidas serían publicadas en forma de libro en 1799 en su  *Géométrie Descriptive* —muy pronto traducida al castellano por Agustín de Betancourt.<sup>4</sup>

Este libro contiene un capítulo final que es algo diferente del resto. En él se explica una idea matemática curiosa, las llamadas líneas de curvatura. Sobre cualquier superficie algebraica es posible determinar dos sistemas o familias de curvas que se encuentran siempre perpendicularmente.<sup>5</sup> Monge demostró que, si movemos la recta normal pasando por una de estas líneas, se genera una superficie que, evidentemente, es reglada, pero que además es desarrollable (figura 5). Es decir, se puede extender sobre un plano, o, dicho de otra manera, se puede obtener flectando adecuadamente un plano.

4. Quien fuera fundador de la Escuela de Ingenieros de Caminos en España, antes de salir exiliado a San Petersburgo, donde realizaría muy importantes obras civiles.
5. Se obtienen siguiendo en cada punto la dirección de la máxima y mínima curvatura.

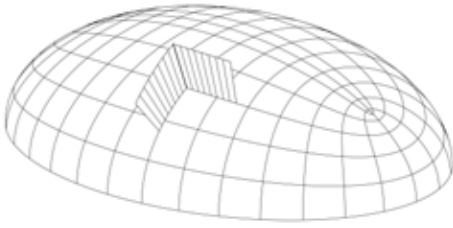


Figura 5. Semi-elipsoide con líneas de curvatura. La recta normal que pasa por ellas engendra superficies regladas que son desarrollables.

Estas circunstancias geométricas coincidían notablemente con las condiciones deseables en un despiece de cantería, antes mencionadas. En efecto, si los lechos y las juntas de la bóveda elipsoidal siguen las líneas de curvatura, los encuentros entre ellos y con el intradós son siempre ortogonales. Y estas superficies son desarrollables, es decir, su talla en piedra se puede controlar con una regla y su perímetro se puede comprobar con una plantilla flexible.

Monge propuso varias aplicaciones prácticas de sus líneas de curvatura, y no se le pasó que representaban la solución definitiva a los problemas de la bóveda sobre planta elíptica.<sup>6</sup> Antes de la publicación de la *Géométrie Descriptive* ya había expuesto la teoría en un artículo que tendría también mucha difusión (Monge 1795), y en el que proponía la aplicación de las líneas de curvatura al diseño del despiece de una bóveda elipsoidal que cubriera la Asamblea Nacional francesa. En aquel momento se estaba buscando la forma más adecuada para esta sala parlamentaria, que finalmente se hizo en hemiciclo, y Monge propuso la planta elíptica, cubierta por una bóveda elipsoidal con el despiece de las líneas de curvatura. Expuso múltiples ventajas de orden práctico.

La idea del despiece de la bóveda elipsoidal según las líneas de curvatura no solo apareció en estas publicaciones, de una extraordinaria difusión en

6. La solución es teóricamente ideal, aunque solo tiene sentido para elipsoides escalenos. Si la sección transversal es una circunferencia, el elipsoide es de revolución y las líneas de curvatura son los paralelos y meridianos que corresponden al eje de giro, horizontal. Sobre el papel de las líneas de curvatura en la estereotomía y la escuela de Monge, puede verse Sakarovitch (1998) y Rabasa (2000).

muchas ediciones, sino que fue adoptada por los autores de los libros de estereotomía durante el siglo XIX. Monge había ofrecido un esquema gráfico de la apariencia de las líneas, pero sus discípulos dibujaron despieces detallados de la bóveda según ese criterio. Nombres como Vallée, Hachette, Adhemar, Leroy, autores de tratados de estereotomía muy difundidos en Francia y el resto de Europa, proponen sutiles variantes. En España sigue apareciendo en el tratado de Antonio Rovira y Rabasa, a final del siglo (figura 6).

#### LAS DIFICULTADES DEL APAREJO

Algunos de estos autores cometen pequeños errores;<sup>7</sup> y generalmente ven como un inconveniente que este aparejo puede dar lugar a una gran diferencia entre las más piezas grandes y las más pequeñas. Pero no mencionan las principales dificultades prácticas. El procedimiento propuesto por todos ellos para la talla de las piezas consiste en algo parecido a lo que en cantería se llama *método de escuadria*, que parte de un sólido capaz, del que se retira la piedra sobrante para obtener la dovela. Se propone, en este caso, prolongar las cuatro facetas de los lechos y las juntas, hasta encontrar a un sólido capaz, un bloque inicial del que se obtendría la pieza. Para facilitar las operaciones gráficas, este sólido previo se disponía con las superficies superior e inferior perfectamente horizontales. Como consecuencia, es inevitable un enorme gasto de piedra. Por otra parte, una vez talladas las superficies mencionadas, sería necesario aplicar sobre ellas plantillas flexibles para marcar

7. Vallée (1828) es el primero en ofrecer un despiece posible (en otras obras mostró la configuración teórica de las líneas de curvatura). En él, el trasdós es también un elipsoide, y por tanto el espesor es variable (no puede haber elipsoides paralelos). Comete el error, que corregirá en otra edición, de afirmar que las juntas resultantes en este elipsoide del trasdós son también sus líneas de curvatura. Adhemar (1834), ofrece otro despiece. Leroy (1844) incluye en su célebre tratado de estereotomía, que vería muchas ediciones, un dibujo muy semejante al de Adhemar, quien reclamó la prioridad. Adhemar y Leroy proponen dos escalones en el trasdós, de altura constante, que tendrían una difícil relación con los lechos que llegan hasta ellos.

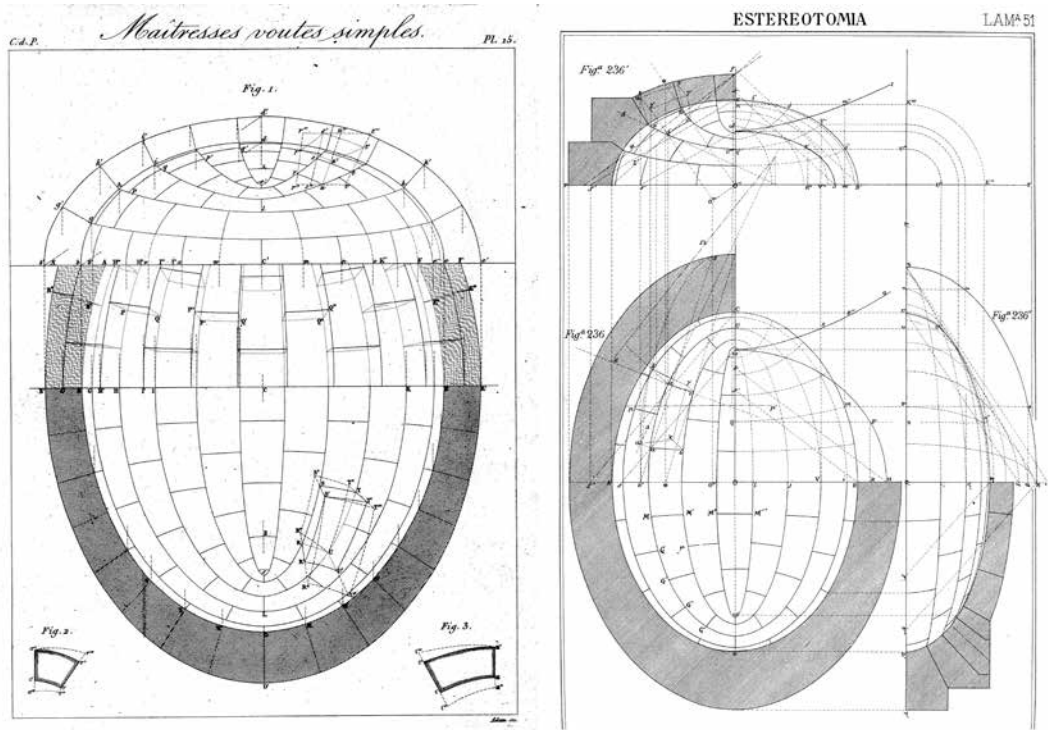


Figura 6. El despiece de la bóveda elipsoidal en Vallée (1828), a la izquierda, y Rovira y Rabassa (1897), a la derecha.

su perímetro real. Y la obtención gráfica de estas plantillas, que serían cuatro para cada pieza, era teóricamente posible, pero debía seguir un método impreciso y lentísimo.

Las piezas serían todas diferentes en cada cuadrante –y simétricas en el contiguo–, y su forma es siempre raramente retorcida y difícil de comunicar a quien ha de tallar. El trazado de las líneas de curvatura, por otra parte, es muy dificultoso en comparación con cualquier otro despiece de cantería. Como consecuencia de todo esto, resulta que la propuesta tuvo una extraordinaria difusión durante decenios, pero no fue ejecutada jamás, hasta ahora.

#### LA EJECUCIÓN DE LA BÓVEDA

Ahora ha sido posible construir la bóveda, con unas dimensiones de cuatro por tres metros de luz interior, gracias a la convergencia de varios facto-

res (figura 7).<sup>8</sup> El diseño por ordenador ha permitido proponer un sólido capaz inicial muy ajustado a la forma final, con poca pérdida de piedra, ha permitido tantear proporciones, determinar con precisión la forma de cada una de las piezas, que han sido ochenta y cuatro, y obtener los desarrollos de las plantillas necesarias –un total de ciento cuarenta y cuatro plantillas, luego impresas a ta-

- Se ha diseñado el despiece de manera que a partir de la tercera hilada se incluyen casetones. Esta era una posibilidad que expresó Monge (1795), para dar luz y ventilación. El espesor es constante, para hacer más sencillo el control de la forma de las piezas (un trasdós también elipsoidal no es necesario desde el punto de vista de la estabilidad, y los lechos no ofrecerían sobre él líneas de curvatura). La primera hilada es escalonada, para permitir un posible zuncho perimetral, pero no con altura constante, como el Adhemar y Leroy, sino variable, manteniendo el encuentro con el lecho y favoreciendo la escorrentía.

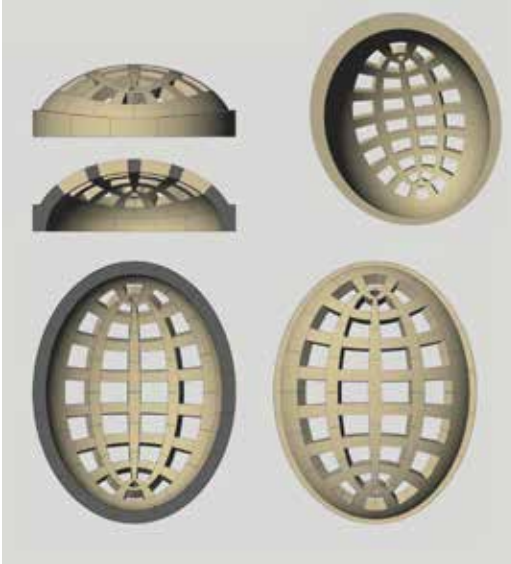


Figura 7. Diseño.



Figura 8. Maqueta previa en piedra artificial.

maño natural. Con impresoras 3D se han obtenido moldes para la realización previa de una maqueta para el ensayo mecánico, formada por piezas de piedra artificial (figura 8). La calidad de la piedra de Villamayor ha permitido una velocidad razonable en la talla de los bloques reales. La ayuda de los Compagnons ha hecho posible desarrollar el



Figura 9. Trabajo de talla.



Figura 10. Interior.



Figura 11. Exterior..

trabajo de cantería con precisión, en el tiempo total de algo más de un mes (figura 9). De esta manera se ha completado una bóveda pensada hace más de dos siglos (figuras 10 y 11).

## LISTA DE REFERENCIAS

- Adhemar, Joseph-Alphonse. 1834. *Coupe des pierres*. París: Bachelier.
- De la Rue, Jean-Baptiste. 1728. *Traité de la Coupe des Pierres*. París: Imprimerie Royale.
- Frézier, [Amédée-François]. 1737-39. *La théorie et la pratique de coupe des pierres et de bois ... ou traité de stéréotomie...* Estrasburgo/París: Jombert.
- Leroy, Charles-F.-A. 1844. *Traité de Stéréotomie*. París: Mallet-Bachelier.
- Monge, Gaspard. 1795. «Análise apliquée à la géométrie». *Journal de l'École Polytechnique* 2 : 145-165.
- Monge, Gaspard. 1799. *Géométrie descriptive*, París, Baudouin (había aparecido ya en el diario de sesiones de la École Normale por lecciones, que han sido reproducidas en Jean Dhombres (ed.), *L'École Normale de l'an III, Leçons de Mathématiques, Laplace-Lagrange-Monge*, París, Dunod, 1992; se tradujo al castellano en 1803)
- Rabasa Díaz, Enrique. 2000. *Forma y construcción en piedra: de la cantería medieval a la estereotomía del siglo XIX*. Madrid: Akal.
- Rovira y Rabassa, Antonio. 1897. *Estereotomía de la piedra*. Barcelona: Provincial de Caridad.
- Sakarovich, Jöel. 1998. *Épures d'architecture, de la coupe des pierres à la géométrie descriptive, XVIe-XIXe siècles*. Basel: Birkhäuser.
- Vallée, Louis-Leger. 1828. *Traité de la Coupe des Pierres*. París: Carilian-Goëury.



UNIVERSIDAD  
DE SALAMANCA



POLITÉCNICA

UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA  
DE MADRID



Ayuntamiento de  
VILLAMAYOR